

Holz und Wärme

Notizen, Begriffe und Literaturübersicht bis 1993

Working Paper**Author(s):**

Popper, Rudolf

Publication date:

2005

Permanent link:

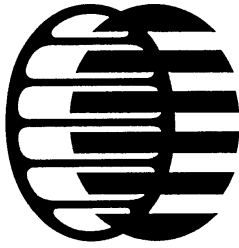
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005085554>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Int. Bericht ETHZ/IfB-HP 32



Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Int. Bericht ETHZ-IfB Nr.32

Holz und Wärme

Notizen, Begriffe und Literaturübersicht bis 1993

R. Popper

Zürich 01. Dezember 2005

Vorwort

In meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der ETH Zürich habe ich mich in den neunziger Jahren unter anderem mit dem Einfluss von Wärme auf die Eigenschaften von Holz befasst. In diesem Zusammenhang habe ich in der Literatur recherchiert und mir Studien-Notizen gemacht. Da Forschung über das Gebiet „Holz und Wärme“ weiter am Institut für Baustoffe betrieben wird, stelle ich mit diesem Bericht die Recherche ohne Anspruch auf Vollständigkeit meinen Kolleginnen und Kollegen zur Verfügung.

1 Holz und Wärme

1.1 Einfluss der Trocknung auf die Gleichgewichtsfeuchtigkeit

Der Einfluss des Trocknens von Holz auf seine hygroskopischen Eigenschaften wurde von [Nagrodski](#) (in [Enger](#) 1937) untersucht und dabei festgestellt, dass bei **70°C** bis **90°C** getrocknetes Holz eine um etwa 2% geringere Gleichgewichtsfeuchtigkeit aufweist als unter natürlichen Bedingungen getrocknetes Holz.

Die von Wise und Jahn ([1952](#)) beobachtete Verringerung der Hygroskopizität des Holzes bei lang anhaltender Trocknung bei **100°C** wird auf die Veränderung im Lignin erklärt.

Trocknungstemperaturen zwischen **100 – 180°C** bewirken eine Herabsetzung der Gleichgewichtsfeuchtigkeit von Holz ([Suematsu et al. 1980](#); [Orman 1955](#)) bis zu 3%, bezogen auf die Freilufttrocknung ([Schneider 1973](#)).

Bei Erhöhung der Trocknungstemperatur von **130°C** auf **180°C** wurde bei Fichte und Buche nur eine geringe Herabsetzung der Gleichgewichtsfeuchtigkeit beobachtet ([Schneider 1973](#)).

Pinus radiata getrocknet im Temperaturbereich zwischen **25°C** und **93°C** zeigt eine Reduktion der Gleichgewichtsfeuchtigkeit und der **Quellung** ([Kininmonth 1976](#)). Bei **77°C** und **115°C** quillt Pinus radiata um 12-35% resp. 17-28% weniger als das luftgetrocknete Holz. Es scheint, dass dies von der **Trocknungsdauer** und der Temperatur abhängig ist.

Feuchtes Holz verursacht bei Darrtrocknung eine höhere Herabsetzung der Gleichgewichtsfeuchte als weniger feuchtes Holz. Damit bei der Darrtrocknung des weniger feuchten Holzes die gleiche Herabsetzung der Gleichgewichtsfeuchtigkeit erreicht wird, muss man höhere Trocknungstemperaturen anwenden ([Kininmonth 1976](#)).

Hauptsächlicher Träger der hygroskopischen Eigenschaften ist das Cellulosemolekül. Nach Tomek und Mittarb. ([1968](#)) können bei mässiger Wärmebehandlung folgende Strukturänderungen angenommen werden:

- Die Wasserstoffbrücken zwischen Cellulose-Cellulose, bzw. Cellulose-Wasser reissen auf (Cellulose-Wasser Verbindungen sind bei 100°C praktisch nicht mehr vorhanden);
- Das freigesetzte Wasser entweicht aus dem System;
- Die freigewordenen OH-Gruppen bilden bei fortschreitendem Wasserverlust entweder eine Sauerstoffbindung oder infolge höherer Wärmebewegung näher kommenden Elektronen eine energetisch stabilere Wasserstoffbindung.

1.2 Massenverlust bei Wärmebehandlung von Holz

Eine Uebersicht über Untersuchungen des Massenverlustes von Nadelholz im Temperaturbereich zwischen **90°C** und **300°C** findet man bei Stamm ([1956](#)) und bis **180°C** bei Topf ([1971a](#), [1971b](#)).

1.3 Trocknungsbedingte Veränderungen der Holzbestandteile

Bei der Trocknung des Holzes sind Veränderungen der Cellulose, Hemicellulosen, des Lignins und der Extraktstoffe zu beobachten. Diese Veränderungen können zu Hygroskopizitäts-, Formstabilitäts- und Durchlässigkeitsänderungen des Holzes führen.

Trocknung des grünen Holzes kann vor allem zu chemischen Veränderungen oder auch zum Verlust der Hemicellulosen führen, ohne dass die Festigkeit des Holzes herabgesetzt wird.

Wenn die Holzfeuchte kleiner ist als 15% (**u > 15%**) und die Trocknungstemperatur höher als **100°C**, ist mit physikalischen Veränderungen im Holzverband (**Verhornung** der Polysaccharide) zu rechnen. Diese Veränderungen führen zur Erhöhung der Dimensionsstabilität und zur Herabsetzung der „Mobilität“ des Holzes. Die Geschwindigkeit

der Wärmeübertragung in das Innere des Trocknungsgutes wird im Vergleich zu nassem Holz herabgesetzt.

Bei sehr **hohen Temperaturen** können sich die Hemicellulosen zu Furfuralpolymeren verwandeln ([Stamm 1946](#)), oder es kann zu einer **Verkettung** zwischen Hemicellulosen und der Cellulose durch Acetalbindungen kommen ([Back 1967](#)), was zur Herabsetzung der Hygroskopizität des Holzes führt.

Die **Erweichungspunkte** werden herabgesetzt, wenn feuchtes Holz während zwei Stunden einer Temperatur von **90°C** oder **100°C** (Plastifizierung) ausgesetzt wird. Man vermutet ([Hillis und Rozsa 1978](#)), dass bei anschließender Abkühlung des Materials die Polymere sich wieder verfestigen, wobei Bindungen in neuen Positionen entstehen. Die Erweichungstemperatur wurde an Holzstäben mit Abmessungen 245 x 5 x 5mm durchgeführt. Dabei wurden die Proben bei ansteigender Temperatur durch ein konstantes Drehmoment von 1,5 Nm belastet und die Torsionsgeschwindigkeit (in Grad/min) als Funktion der Temperatur dargestellt.

Im Temperaturbereich von **20°C** bis **120°C** wurden auf der Torsionsgeschwindigkeit/Temperatur-Kurve zwei ausgeprägte Peaks TT1 und TT2 sichtbar, die als Erweichungstemperatur der Hemicellulosen (TT1 ca 80°C) und Lignins (TT2 ca 100°C) gedeutet wurden ([Hillis und Rozsa 1985a](#)). Die Untersuchungen wurden an parallel zur Faserrichtung orientierten Proben aus Pinus radiata (frisches Holz und Holz mit etwa 12% Wassergehalt) durchgeführt. Ergebnisse:

- Mit zunehmendem Abstand der Probenstäbe vom Mark sind die Peaks deutlicher ausgeprägt; zugleich steigt TT1 an. Dies wird auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Hemicellulosen im Jung- und Altholz, bzw. im Kern- und Splintbereich zurückgeführt.
- Die Möglichkeit zur Erweichung des Holzes nimmt ab, wenn der Feuchtegehalt unter Fasersättigung liegt.
- Die Erweichungstemperatur feuchten Holzes wird durch eine thermische Vorbehandlung des Holzes (bei mindestens 100°C) erniedrigt.

Eine physikalische Umwandlung eines Stoffes tritt dann auf, wenn im Verlauf einer Zustandsänderung (z.B. Temperaturerhöhung) eine physikalische Eigenschaft sich diskontinuierlich ändert. Popper und Eberle ([1993](#)) haben bei einer schnellen, linear ansteigenden Erwärmung des trockenen Fichtenholzes zwischen 120°C und 170°C auf der thermomechanischen Kurve eine irreversible **Umwandlungstemperatur** von **154°C** festgestellt. Der Verlauf der thermomechanischen Kurve deutet auf eine Erhöhung der Strukturordnung des Materials hin, was einer Vergütung des Holzes gleich kommt.

Nach thermischer Behandlung des Holzes bei **150°C** und anschließendem Abkühlen fand Bariska ([1980](#)) einen höheren Torsionsmodul als den Ausgangswert. Er begründet diese „hochgradige“ **Verfestigung**

mit Bildung halbchemischer und van-der Waalscher Bindungen unter den holzeigenen Substanzen.

Den Einfluss von Wärme auf die **Steifigkeit** und **Stabilität** haben Hillis und Rozsa ([1985b](#)) an *Pinus radiata* mit der Torsionsmethode untersucht. Der Drehwinkel wurde dabei als ein Mass für die Stabilität des Holzes angenommen. Die Proben wurden vorbehandelt (Trocknungstemperaturen von **30°C**, **100°C** und **120°C**; zusätzlich eine kurzzeitige Wärmebehandlung bis **180°C**). Ergebnisse:

- Die Unterschiede zwischen Kern und Splint sind beträchtlich, wirken sich aber bei den drei untersuchten Bäumen sehr verschieden aus.
- Die Drehwinkelzunahme war umso geringer und damit die Stabilität umso günstiger, je höher die Temperatur bzw. je länger ihre Einwirkung bei Trocknung oder Vorbehandlung.

Die Erweichungsänderungen sind einerseits von Temperatur/Zeit/Feuchtigkeit-Relation und von der Chemischen Struktur der Matrix abhängig.

Goring und Mitarb. ([1963](#)) verfolgten die thermische Erweichung des Holzes und stellten fest, dass das **Lignin** zwischen **130°C** und **190°C**, die **Cellulose** zwischen **230°C** und **245°C** und die **Hemicellulosen** zwischen **167°C** und **181°C** eine Erweichung aufweisen.

Im Gegensatz zu Sandermann und Augustin ([1963](#)) (Zersetzungsintervall **270°C** bis **400°C**) deuten die von Tomek u. Mitarb. ([1968](#)) durchgeführten TG- und DTA-Messungen darauf hin, dass die Zersetzung des **Lignins** schon bei **160°C** beginnt (Zersetzungsintervall **160°C-300°C**), also bei niedrigeren Temperaturen als die Cellulose. Die DTA- und TG-Kurven zeigen, dass sich Lignin zersetzt (Gewichtsabnahme und exotherme Änderung) und nicht, wie von Sandermann und Augustin ([1963](#)) angenommen wurde, lediglich erweicht.

Bei Hochtemperaturtrocknung mit hohen Trocknungsraten entstehen vermutlich mehr elastische als plastische Deformationen ([Mackay und Rumball 1972](#)).

1.4 Dilatometrische Untersuchungen

Die niedrige Wärmeausdehnung von Holz wirkt sich bei Säulen und Balken günstig aus.

Abe ([1973](#)) untersuchte die **Wärmeausdehnung** von Holz (*Chamaecyparis obtusa*, *Fagus crenata* und *Betula maximowiczii*) von Probengrösse 4x4x20mm, 20mm in der jeweiligen Messrichtung tg, rd, ax im Temperaturbereich zwischen **110°C** und **250°C** bei Heizrate von 0.625°C/min und 2.5°C/min mit dem Ziel, die Diskontinuität der Temperatur-Dehnungsfunktion mit der, mit anderen thermoanalytischen Methoden bestimmten Erweichungstemperatur zu ermitteln. Die **Diskontinuität** wurde im Temperaturbereich zwischen **80°C** und **110°C** gefunden.

Den Einfluss der **Heizrate** auf die **Wärmeausdehnung** von Holz im Temperaturbereich zwischen **100°C** und **120°C** haben Popper und Eberle (1992) untersucht. Es wurde angestrebt, methodisch den Einfluss der Heizrate – die einen wichtigen praktischen Aspekt darstellt – auf die Wärmeausdehnung des Holzes zu untersuchen. Es ist vermutlich die einzige systematische Untersuchung in Bezug auf den Einfluss der Heizrate auf die Wärmeausdehnung von Holz.

Die Gegenüberstellung der Resultate von Abe (1973) und Popper, Eberle (1992) ist aus Tabelle 1 ersichtlich. Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, ist ein direkter Vergleich der Resultate nicht möglich, da einerseits in den beiden Arbeiten nicht die gleichen Holzarten (Ausnahme Buchenholz vs. Gedämpftes Buchenholz) und ganz unterschiedliche Temperaturbereiche verwendet wurden. Die von Abe für die jeweilige Holzart und die drei anatomischen Richtungen bestimmten Expansionskoeffizienten gelten für unterschiedliche Temperaturbereiche. Innerhalb einer Holzart überschneiden sich die Temperaturbereiche für die unterschiedlichen Heizraten fast nur bei der Radialrichtung, sodass für die übrigen anatomischen Richtungen ein quantitativer Vergleich des Einflusses der Heizrate auf die Expansionskoeffizienten nicht möglich ist. Die hohen Temperaturbereiche lassen darauf schließen, dass bei Abe die Wärmeausdehnungsmessungen für die drei anatomischen Richtungen nicht an der gleichen Probe durchgeführt werden konnten (thermische Zersetzung). Die Tabelle lässt weiter darauf schließen, dass Abe nicht die Absicht hatte, systematisch den Einfluss der Heizrate auf die Wärmeausdehnung des Holzes zu studieren (nur zwei Heizraten, bei *Chamaecyparis* sogar nur für die Radialrichtung). Qualitativ betrachtet unterstützen die Messungen von Abe die Resultate von Popper und Eberle (1992), in dem bei Abe eine Tendenz festzustellen ist, dass mit steigender Heizrate die Wärmeausdehnung von Holz zu steigen scheint.

Tabelle 1-1: Gegenüberstellung der Resultate von Abe (1973) und Popper, Eberle (1992)

Holzart	Anatom. Richtung	Heizrate °K/Min	Exp. Koeff. 10^{-6} .m/KJ	Temperaturbereich in°C	Literaturquelle
Chamaecyparis	TG	2.5	45	160 -180	Abe (1973)
	RD	2.5	28	150 -200	
	AX	2.5	7	190 -210	
	RD	1.25	23	140 -170	
Buchenholz	TG	2.5	60	170 -190	
	RD	2.5	30	130 -190	
	AX	2.5	10	230 -250	
	TG	0.625	40	140 -170	
	RD	0.625	25	110 -170	
	AX	0.625	15	225 -250	
Birkenholz	TG	2.5	35	160 -170	
	RD	2.5	25	130 -160	
	AX	2.5	10	220 -240	
	TG	0.625	15	120 -160	
	RD	0.625	20	110 -160	
	AX	0.625	5	160 -200	

Bucheholz gedämpft	TG	0*	38	100 -120	Popper und. Eberle (1992)
	RD	0*	28		
	AX	0*	1		
	TG	5	44		
	RD	5	31		
	AX	5	2		
	TG	10	49		
	RD	10	34		
	AX	10	3		
	TG	20	60		
	RD	20	40		
	AX	20	5		
Fichtenholz	TG	0*	33		
	RD	0*	23		
	AX	0*	2		
	TG	5	36		
	RD	5	25		
	AX	5	1		
	TG	10	39		
	RD	10	27		
	AX	10	0		
	TG	20	46		
	RD	20	31		
	AX	20	-1		

*) Extrapolierte Werte

Die Arbeit von Kübler, Liang und Cang ([1973](#)) hat gegenüber Popper, Eberle ([1992](#)) ebenfalls eine andere Fragestellung. Der untersuchte Temperaturbereich liegt hier zwischen -25°C und 95°C. Kübler und Mitarb. untersuchten das feuchte Holz, wobei Popper und Eberle das trockene Holz untersuchten.

Zur physikalischen Erklärung des in der Arbeit von Popper und Eberle aufgeführten Phänomens (Heizrate vs. Wärmeausdehnung) sind vorderhand noch keine Anhaltspunkte gesucht worden, weil hier die praktische Anwendung der Resultate angestrebt wurde.

Der Temperaturgradient im Probenkörper ist einerseits von den inhärenten Eigenschaften der Holzsubstanz, von der Raumdichte, von der spezifischen Wärme und der Wärmeleitfähigkeit, und andererseits von den Umgebungsbedingungen wie Dimensionen und Form des Festkörpers, Art der Wärmeübermittlung usw. abhängig. Die Probenform und Probenabmessungen wurden in der Arbeit von Popper und Eberle ([1992](#)) apparaturbedingt gewählt, um den empfindlichsten Messbereich der Apparatur ausnützen zu können und möglichst konstante Bedingungen für die Messungen in den drei anatomischen Hauptrichtungen des Holzes zu gewährleisten. Die Messanordnung wurde durch die kommerzielle Apparatur (TMA40, Mettler Instrumente AG, Schweiz) gegeben. Um die Untersuchungsbedingungen konstant zu halten, wurde die Beschaffenheit des Probenmaterials durch die Anwendung von Holz gleicher Herkunft in engem Streubereich gehalten.

Kubat, Martinlöf und Sörenmark ([1969](#)) führten dilatometrische Untersuchungen der Cellulose I und II und Hemicellulose durch und stellten fest, dass im Temperaturbereich zwischen -5°C und 70°C drei dilatometrische Übergänge (+15°C, +37°C und 60°C) auftreten.

1.5 Wärmediffusion durch das Holz

Berechnungen und Messungen der Wärmeübertragung werden heute noch weitgehend unter der Voraussetzung **stationärer Verhältnisse** durchgeführt, d.h. die Temperatur beidseits des betrachteten Holzes ist konstant.

Die wirklichen klimatischen Verhältnisse weichen von stationären Verhältnissen erheblich ab. Das Aussenklima weist bedeutende tages- und jahreszeitliche Schwankungen der Lufttemperatur auf. Infolge der direkten Sonnenbestrahlung oder sogar infolge eines Brandfalles kann ein Holzbauteil Oberflächentemperaturen aufweisen, die weit über den Lufttemperaturen liegen. Die thermischen Stoffwerte (z.B. Wärmeausdehnungskoeffizient) beruhen ebenfalls auf stationären Verhältnissen, so dass nicht erwartet werden darf, dass diese Werte mit den tatsächlichen Gegebenheiten genau übereinstimmen.

Die Erwärmung der Bauteile kann je nach Farbe und Oberflächenbeschaffenheit stark differieren ([Würgler 1960](#)).

Tabelle 1-2: Maximale Oberflächentemperatur des angestrichenen Holzes. Anstrichdicke 90 bis 110µm ([Würgler 1960](#))

RAL-Farbton Nr.	Farbton	Max. Oberflächentemperatur °C
1004	Gelb	50
1007	Chromgelb	51 – 55
1015	Hellelfenbein	49
2002	Blutorange	55 – 61
3000	Feuerrot	55 – 61
3003	Rubinrot	67
5007	Brillantblau	75
5010	Enzianblau	67 – 72
6011	Resedagrün	61 – 70
7001	Silbergrau	61 – 70
7011	Eisengrau	68 – 71
7031	Blaugrau	61 – 76
8003	Siena	63 – 74
9001	Weiss	40
9005	Tiefschwarz	77 - 80

Tabelle 1-3: Oberflächentemperaturen verschiedener Baustoffe ([Würgler 1960](#))

Baustoff	Farbe	Temperatur (°C)		
		Min.	Max.	Differenz
Mauerwerk, Beton	Hell	-20	50	70
Mauerwerk, Beton	Dunkel	-25	65	90
Glas, Keramik, Metall	Hell	-25	60	85
Glas, Keramik, Metall	Dunkel	-30	80	110
PVC	Hell	-20	60	80
PVC	Dunkel	-30	90	120

Holz natur		-20 bis -25	60	80 – 85
Holz gestrichen	Hell	-20 bis -25	50	70 - 75
Holz gestrichen	Dunkel	-20 bis -25	70	90 – 95

1.6 Wärmeleitzahl

Definition: Die Wärmeleitzahl λ (kcal/m.h.°C) ist gleich der Wärmemenge (kcal), die in einer Stunde (h) durch einen Quadratmeter (m²) eines Stoffes in Richtung des Temperaturgefälles hindurchfliesst, wenn dieses 1°C pro m beträgt.

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Wärmezahl, je nach Baustoff zu oder ab. Durch Feuchtigkeit wird sie stark beeinflusst, da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser etwa 25mal grösser ist als die von Luft.

1.7 Spezifische Wärme

Definition: Die spezifische Wärme c (kcal/kg.°C) ist die Wärmemenge in kcal, die man einem kg (Masse) eines Stoffes zuführen muss, um ihn um 1°C zu erwärmen.

Das Holz weist eine relativ hohe spezifische Wärme auf. Es wird also durch eine gegebene Wärmemenge auf eine viel niedrigere Temperatur gebracht als Körper mit niedrigerer spezifischer Wärme.

Die spezifische Wärme des Holzes ist abhängig von der Temperatur. Die wahre spezifische Wärme des Holzes lässt sich nach Dunlap ([1912](#)) wie folgt ausdrücken:

Formel 1-1

$$c = 0.266 + 0.00116 \cdot T$$

Wobei c ...wahre spezifische Wärme in kcal/kg.°C

T ... Temperatur °C.

Von der Raumdichte ist die spezifische Wärme nach Dunlap ([1912](#)) unabhängig. Erwartungsgemäss hat die Feuchtigkeit einen beträchtlichen Einfluss auf die spezifische Wärme des Holzes. Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die spezifische Wärme geht aus folgender Gleichung hervor:

Formel 1-2

$$c_u = c_w \cdot \frac{u}{1+u} + c_0 \cdot \left(1 - \frac{u}{1+u}\right) \approx \frac{u + 0.324}{u + 1}$$

Wobei c_0 ... spezifische Wärme des völlig trockenen Holzes,

c_u ... spezifische Wärme des feuchten Holzes,

c_w ... spezifische Wärme des Wassers ($c_w=1$),

u ... Holzfeuchtigkeit.

Tabelle 1-4: Wärmeleitzahlen, spez. Wärme und Wärmeausdehnungskoeff. einiger Materialien (Würgler, 1960)

Material	Wärmeleitzahl λ kcal/m.h.°C	spez. Wärme c kcal/kg.°C	Wärmeausdehnungskoeff. α $\mu\text{m/m.}^\circ\text{C}$
Beton	1.3	0.25	13
Kork	0.04	0.45	
Polystyrol	0.035	0.35	80
Polyurethan	0.035 – 0.04	0.33	110 – 130
Stahl	35 – 50	0.20	12
Aluminium	175	0.20	24
Kupfer	330	0.20	17
Luft (ruhend)	0.021	0.24	
Wasser	0.5	1.00	
Buche, Eiche: u=15%, axial	0.30	0.4	ax=3 – 6
u=35%, axial	0.34	0.6	ax=3 – 6
u=15%, transv.	0.14	0.4	tg=25 – 50, rd=15 – 35
u=35%, transv.	0.16	0.6	tg=25 – 50, rd=15 – 35
Fichte, Tanne: u=15%, axial	0.22	0.4	ax=3 – 6
u=35%, axial	0.25	0.6	ax=3 – 6
u=15%, transv.	0.10	0.4	tg=25 – 50, rd=15 – 35
u=35%, transv.	0.12	0.6	tg=25 – 50, rd=15 – 35
Fichte: *) u=16%, axial, u=16%, radial, u=16%, tangent.	0.1908 0.1044 0.0900		
Esche: *) u=15%, axial, u=15%, radial, u=15%, tangent.	0.2628 0.1512 0.1404		

Legende: *) nach Griffiths, E. und Kaye, W. C. in Kollmann (1951)

Die grösseren Wärmeleitzahlen des Holzes in der Radial- gegenüber der Tangentialrichtung sind auf die Markstrahlen (Leitungen kleineren Widerstandes) zurückzuführen. Parallel zur Faser beträgt die Wärmeleitzahl der Hölzer etwa das Doppelte des Wertes quer zur Faser.

Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitzahl des Holzes ist für den Temperaturbereich zwischen -50°C bis 100°C durch folgende empirische Gleichung gegeben (Kollmann, 1951):

Formel 1-3

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot (1 - (1.1 - 0.98 \cdot r_0) \cdot \frac{T_1 - T_2}{100})$$

Wobei: r_0 ... Darr-Raumdicke des Holzes,
T1, T2 ..Temperatur.

1.8 Wärmespeicherfähigkeit

Definition: Die pro Volumeneinheit eines Stoffes gespeicherte Wärme beträgt $r \cdot c$ in kcal/m³·°C, wobei r =spezifisches Gewicht des Materials ist. Die Wärmespeicherfähigkeit spielt bei instationären Vorgängen eine Rolle (siehe weiter).

1.9 Temperaturleitzahl

Die Temperaturleitzahl (auch als **Temperaturleitfähigkeit** bekannt) a (m²/h) ist ein Stoffwert, der die thermischen Eigenschaften des Materials in Berechnungen von instationären Wärmebewegungen vertritt. Je grösser die Wärmeleitzahl und je kleiner das Wärmespeichervermögen, desto rascher steigt die Temperatur in einem Bauteil.

Formel 1-4

$$a = \frac{\lambda}{r \cdot c}, \text{ (m}^2/\text{h)},$$

wobei λ ... Wärmeleitzahl in kcal/m.h.°C,
 r ... spezifisches Gewicht in kg/m³,
 c ... spezifische Wärme in kcal/kg.°C.

Die Temperaturleitzahl ist von der Holzfeuchtigkeit praktisch unabhängig. Aufgrund der Temperaturleitfähigkeit lässt sich der Temperaturverlauf in Hölzern schätzen ([Kollmann, 1951](#)):

Für nicht stationäre Wärmeleitung gilt die Fouriersche Differentialgleichung:

Formel 1-5

$$\frac{dt}{dZ} = a \cdot \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right),$$

wobei d Partialdifferential,
 t Temperatur,
 x, y, z ... Koordinaten eines Punktes im Holz,
 Z Zeit.

Unter der Voraussetzung eines unendlich langen Balkens, bei dem die Temperaturänderungen in einer Querschnittebene (in welcher der Punkt (x, y, z) liegt), unabhängig von der Wärmeleitung in der Längsrichtung sind, vereinfacht sich die Gleichung zu:

Formel 1-6

$$\frac{dt}{dZ} = a \cdot \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} \right).$$

Da das Holz ein anisotropes Material ist und die Temperaturleitzahl der Tangential- und Radialrichtung verschieden sein dürfte, nimmt die Differentialgleichung folgende Form an:

$$\frac{dt}{dZ} = a_r \frac{d^2 t}{dx^2} + a_t \frac{d^2 t}{dy^2}.$$

Durch Lösung dieser Gleichung und durch die Beschränkung auf das erste Glied der Fourierreihe gelangt man zum allgemeinen Ausdruck für die Temperatur t in irgendeinem Punkt(x,y) zur Zeit Z:

Formel 1-7

$$t = t_1 + (t_0 - t_1) \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot (e^{-\pi^2 \cdot Z \cdot (a_r / b^2 + a_t / h^2)}) \sin(\pi \cdot x / b) \cdot \sin(\pi \cdot y / h),$$

wobei

- t Temperatur in Punkt(x,y) zur Zeit Z,
- t₀ ... Anfangstemperatur des Holzes vor der Erwärmung,
- t₁ ... Oberflächentemperatur während der Erwärmung,
- x,y .. Koordinaten des Punktes,
- b Abmessungen des Holzes in x-Richtung,
- h Abmessungen des Holzes in y-Richtung,
- Z Zeit,
- a_r Temperaturzahl in der Radialrichtung,
- a_t Temperaturzahl in der Tangentialrichtung.

Bei instationärer Wärmeeinwirkung beträgt die Wärmeleitung in einem ebenen Bauteil in der Richtung der Wärmeeinwirkung:

Formel 1-8

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{r \cdot c} \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} = a \cdot \frac{d^2 T}{dx^2},$$

wobei T Temperatur,

- t Zeit,
- r spez. Gewicht,
- c spez. Wärme,
- a Temperaturleitzahl,
- x .. Dicke des Materials in der Richtung der Wärmeeinwirkung.

1.10 Wärmeeindringzahl

Die Wärmeeindringzahl b (kcal/m².SQR(h).°C) ist ein Stoffwert, der bei der Berechnung von instationären Wärmebewegungen verwendet wird. Je grösser die Wärmeleitfähigkeit λ und das Wärmespeichervermögen sind, desto rascher dringt Wärme in das Material ein:

Formel 1-9

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{b^2} \cdot \frac{d^2T}{dw^2},$$

wobei T Temperatur,
 t Zeit,
 b Wärmeeindringzahl,
 w Wärmedurchlasswiderstand $w=x/\lambda$.

Tabelle 1-5: Wärmeeindringzahl verschiedener Materialien ([Würgler, 1960](#)).

Material	Wärmeeindringzahl b kcal/m ² .SQR(h).°C
Beton	28
Kork	2
Polystyrol	0.65
Buche, Eiche	9.2
Fichte, Tanne	6.1

1.11 Wärmeübertragung bei stationären Bedingungen

Die Wärmeübertragung erfolgt auf drei Arten:

- Leitung (Konduktion)
 - Die Wärmeenergie wird unter den unmittelbar benachbarten Teilchen des Körpers ausgetauscht,
- Strahlung
 - Die Wärmeenergie wird hier von einem Körper zum anderen, ohne dass der Zwischenraum mit einem Stoff gefüllt ist, übertragen (elektromagnetische Wellen),
- Konvektion oder Strömung
 - Die Wärmeenergie wird durch Teilchen, die sich im Raum bewegen übertragen (z.B. durch ein Gas).

Wärme fließt immer von der wärmeren zur kälteren Seite. Je besser die Wärmeisolation ist, umso geringer ist die durchgelassene Wärmemenge.

1.12 Wärmeleitung in festen Stoffen

1.12.1 Berechnung des Temperaturverlaufes

Die Wärmeübertragung von Teilchen zu Teilchen wird als Wärmeleitung bezeichnet. Die durch eine Fläche F (m²) transportierte **Wärme-**

menge Q (kcal) beträgt bei einer Temperaturdifferenz ΔT (°C) und einer Schichtdicke d (m) in einem bestimmten Zeitintervall t (h):

Formel 1-10

$$Q = \lambda \cdot F \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

Im stationären Zustand ist Q für aufeinander folgende gleichartige Stoffschichten gleich. Das Temperaturgefälle in einer homogenen Schicht ist linear.

Die in einer Stunde transportierte Wärmemenge wird als **Wärmestrom** $Q(\text{punkt})$ bezeichnet:

Formel 1-11

$$Q(\text{punkt}) = \frac{Q}{t}, \text{ (kcal/h).}$$

Als **Wärmestromdichte** $q(\text{punkt})$ gilt die in einer Stunde durch einen Quadratmeter (m^2) transportierte Wärmemenge:

Formel 1-12

$$q(\text{punkt}) = \frac{Q}{F \cdot t} = \frac{Q(\text{punkt})}{F} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d}, \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{h),}$$

Die Wärmestromdichte ist umso grösser, je grösser die ursächliche Temperaturdifferenz ΔT und je kleiner der Wärmedurchlasswiderstand d/λ ist:

Formel 1-13

$$\text{Wirkung}(q(\text{punkt})) = \frac{\text{Ursache}(\Delta T)}{\text{Widers tan } d(d / \lambda)}.$$

1.13 Thermische Zersetzung des Holzes

Die thermische Zersetzung des Holzes zeichnet sich durch Gewichtsverlust, durch Veränderung der Festigkeitseigenschaften, durch Wärmeentwicklung (exothermische Prozesse), durch Wärmeabsorption (endothermische Prozesse) oder durch Veränderung in der Elementarzusammensetzung der Restsubstanz aus.

Der **Zündpunkt** der Holzkohle hängt einerseits von der Temperatur, von der Dauer der Temperatureinwirkung und der Atmosphäre ab. Unter lang anhaltender Temperatureinwirkung (unter Luftzutritt) liegt der Zündpunkt umso niedriger, je niedriger die Zersetzungstemperatur ist ([Schwarz 1964](#)). Bei kürzerer Temperatureinwirkung ist hingegen eine Erhöhung des Zündpunktes zu beobachten ([Thomas und Bowes 1961](#)).

Die **Brennbarkeit** des Holzes ist nach Kollmann ([1966](#)) nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von seinen Abmessungen und den geometrischen Verhältniszahlen abhängig.

Die **Entzündbarkeit** hängt vom Oberfläche/Volumen-Verhältnis und von der Entzündungstemperatur ab, die durch Erwärmungsgeschwin-

digkeit, Belüftungsgeschwindigkeit, Dauer der Wärmeeinwirkung und An- oder Abwesenheit der Flamme beeinflusst wird. Zwischen **100°C** und **150°C** sind die chemischen Veränderungen unbedeutend. Bei **150°C** tritt deutlich eine **Zersetzung** ein. Zwischen **150°C** und **200°C** schreitet die **Dehydrierung** des Holzes fort, mit ständigem Gewichtsverlust und exothermer Reaktion. Oberhalb von **275°C** wird die **Verbrennung** sehr aktiv (stark exotherm). Die grössten Mengen von Kohlenwasserstoffen werden im Temperaturbereich zwischen **400°C** und **420°C** gebildet (starker **Anstieg des Heizwertes**). Oberhalb **500°C** nimmt die Gasbildung stark ab.

Eine Zersetzung der Holzsubstanz findet schon bei normaler Umgebungstemperatur statt ([Narayanamurti et al. 1961](#)), jedoch im Verlauf von mehreren hundert Jahren.

Enger ([1937](#)) stellte beim Holz im Temperaturbereich zwischen **102°C** bis **105°C** einen Verlust an Acetylgruppen von 0.1% bis 0.6% (**Zellwandabbau**).

Nach Kollmann u. Mitarb. ([1969](#)) findet ein thermischer Abbau der Cellulose erst oberhalb von **120°C** (Veränderungen in der **übermolekularen Struktur**) statt. Im molekularen Bereich sind Veränderungen schon bei tieferen Temperaturen nachweisbar. Der **Durchschnittspolymerisationsgrad** der **Cellulose** sinkt schon bei **100°C** von DP=1500 auf DP=1150. Ab 100°C macht sich langsam der Abbau der **Hemicellulosen** und die Umwandlung der Monomeren in wasserdampfgefährliches **Furfurol** und **Methylfurfurol** bemerkbar. Das **Lignin** wird als das temperaturstabilste Glied der Holzsubstanz angenommen. Bis **150°C** ist (bei Kiefer und Eiche) kein Abbau des Lignins feststellbar.

Die Veränderungen der übermolekularen Struktur bei thermischer Behandlung haben Roffael und Schaller ([1971](#)) studiert. Sie kamen zum Schluss, dass der **Ordnungszustand** der **Cellulose** bei thermischer Behandlung zuerst ansteigt, um dann abzufallen. Das gleiche gilt auch für den **α-Cellulosegehalt**. Der DP-Wert zeigt hingegen eine stetige Abnahme.

Die **Zersetzungstemperaturen** der Hauptbestandteile sind nach Sandermann und Augustin ([1963a](#), [1963b](#)): **Hemicellulose**: 200°C-260°C, **Cellulose**: 240°C-350°C, **Lignin**: 280°C-500°C. Tomek und Mitarb. ([1968](#)) geben für das Lignin einen Zersetzungsintervall zwischen 160°C und 400°C an.

Stamm ([1956](#)) fand für die Zersetzung des Holzes sowie für die einzelnen Holzkomponenten die gleiche **Aktivierungsenergie** (109-124 kJ/mol). Die **α-Cellulose** und das Holz werden bei **150°C** gleich stark abgebaut. Das **Lignin** wird halb so stark abgebaut, wobei **Polyosen** viermal stärker als das Holz abgebaut werden. Nach Freudenberg ([1964](#)) kommt aber Lignin in der Natur nie frei, sondern nur an Cellulose und Polyosen gebunden vor, sodass man je nach Aufschlussverfahren mit Veränderungen der Holzkomponenten rechnen muss.

Schneider ([1971](#)) gelangte zu dem Ergebnis, dass der Grad der thermischen Zersetzung der Holzsubstanz nicht nur von der Höhe der **Temperatur**, ihrer **Einwirkungszeit** und dem Vorhandensein oder

Fehlen von **Luft**, sondern auch von den **Abmessungen** des Holzes abhängig ist. Letztere sind ausschlaggebend für den Widerstand, der den gasförmigen Zersetzungsprodukten beim Verlassen der Holzes entgegengesetzt wird.

1.14 Kinetik der thermalen Zersetzung

Die thermale Zersetzungsgeschwindigkeit des **trockenen Holzes** folgt einer chemischen Reaktion der ersten Ordnung (Stamm; Burr; Kline [1946](#)). Die Reaktionsgeschwindigkeiten bei der Zersetzung des **nassen Holzes** sind 10mal bis mehrfach grösser. Rusche ([1973](#)) hat bei der Rotbuche und Fichte die Kinetik des Massenverlustes bei Wärmebehandlung in Luft, in Vakuum und in Stickstoffatmosphäre studiert und dabei auch die Dauer der Wärmeeinwirkung berücksichtigt. Für die Kinetik der Reaktion hat er eine analytische Gleichung entworfen, die auf der Arrhenius-Gleichung basiert.

Temperatur und **Zeit** stehen, als veränderliche Parameter, in engem Zusammenhang. Eine kurze Wärmebelastung bei höherer Temperatur schädigt die Holzsubstanz weniger als eine längere Einwirkung von niedrigerer Temperatur. In Anwesenheit von Wasserdampf spielen sich hydrolytische Zersetzungs Vorgänge ab. In oxydativer Atmosphäre ist die Zersetzung mit einer Zunahme von Carbonyl- und Carboxylgruppen zu rechnen, wobei in einer inerten Atmosphäre ausschliesslich mit thermischer Zersetzung zu rechnen ist.

2 Literatur

- 1 ABE, FUSAKO. 1973: Studies on Thermal Properties of Wood and Woody Materials. IV. Thermal Expansion for Wood. Mokuzaï Gakkaishi 19(2): 69-74.
- 2 BACK E. L., 1967: Thermal Auto-Crosslinking in Cellulose Material. Pulp and Paper Magazine of Canada: (4): 1-7.
- 3 BARISKA, M. 1980: Erweichung und Wiederverfestigung des Holzes im Temperaturbereich bis 300°C – gemessen mit Hilfe der Torsions-Schwingung-Technik. SAH-Bulletin (1): 1-13.
- 4 DUNLAP, F. 1912: The Specific Heat of Wood. US. Dept. Agric. Bull. Nr. 110, Washington D.C.
- 5 ENGER, K. 1937: Neuere Erkenntnisse über die Vergütung der Holzeigenschaften. Mitt. Fachaussch. Holzfragen. 18: 2-3.
- 6 FREUDENBERG, K. 1964: Entwurf eines Konstitutionsschemas für das Lignin der Fichte. Holzforschung 18: 3-9.
- 7 GORING, D. A. I. 1963: Thermal softening of lignin, hemicelluloses and cellulose. Pulp and Paper Mag. Canada 64: 517-527.
- 8 HENDERSHOT, O. P. 1924: Thermal expansion of wood. Science 60(1559): 456-457.
- 9 HILLIS, W. E. 1984: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1. General considerations. Wood Sci. Technol. 18: 218-293.
- 10 HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. 1978: The softening temperatures of wood. Holzforschung 32: 68-73.
- 11 HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. 1985a: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 2. The effect of heat on the softening of radiate pine. Wood Sci. Technol. 19(1): 57-66.

- 12 HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. 1985b: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 3. The effect of heat on rigidity and stability of radiate pine. Wood Sci. Technol. 19(2): 93-102.
- 13 HORN, R. A. 1979: Bonding in press-dried sheets from high-yield pulps. The role of lignin and hemicelluloses. Tappi 62(7): 77-80.
- 14 KININMONTH, J. A. 1976: Effect of timber drying temperature on subsequent moisture and dimensional changes. N.Z.J. Forest Sci 6: 101-107.
- 15 KOLLMANN, F. 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1050 S.
- 16 KOLLMANN, F. 1966: Wood and Fire. Wood 31(5): 37-40.
- 17 KOLLMANN, F.; SCHMIDT, E.; KUFNER, M.; FENGEL, D.; SCHNEIDER A. 1969: Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch mechanische und thermische Beanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 27(11): 407-425.
- 18 KUBAT, J.; MARTIN-LÖF, S.; SÖRENMARK, C. 1969: A dilatometric study of secondary transitions in cellulose between -5°C and +70°C. Svensk Papperstidn 72(22): 731-734.
- 19 KÜBLER, H. 1959: Längenänderungen bei Wärmebehandlung frischen Holzes. Holz Roh- Werkstoff 17(3): 77-86.
- 20 KÜBLER, H.; LIANG, L.; CHANG, L. S. 1973: Thermal expansion of moist wood. Wood and Fiber 5(3): 257-267.
- 21 MACKAY, J. F. G.; RUMBALL, B. L. 1972: Plasticizing distortion-prone softwood studs prior to high temperature seasoning. Forest Prod. J. 22(6): 27-28.
- 22 NAGRODSSKI, I. A. 1951: Beziehungen des Holzes zum Wasser und seine physikalischen Eigenschaften. in NIKITIN, W. M.,: Chimija drevesiny I celjulosy, Moskwa, Leningrad.
- 23 NARAYANAMURTI, D.; PRASAD, B. N.; VERMA, G. M. 1961: Ein altes Pterocarpus-Holz aus Tirupathi. Holz Roh- Werkstoff 18(2): 47-50.
- 24 ORMAN, H. R. 1955: The response of New Zealand timbers to fluctuations in atmospheric moisture conditions. Tech. Pap. Forest Res. Inst. N. Z. Forest Ser. No. 8.
- 25 POPPER, R.; EBERLE, G. 1992: Einfluss der Heizrate auf die Wärmeausdehnung von Holz im Temperaturbereich zwischen 100°C und 120°C. Drevarsky vyskum 134: 27-38.
- 26 POPPER, R.; Eberle, G. 1993: Untersuchungen Thermomechanischer Eigenschaften des getrockneten Holzes. Drevarsky vyskum 135(2): 11-17.

- 27 ROFFAEL, E.; SCHALLER, K. 1971: Einfluss thermischer Behandlung auf Cellulose. Holz Roh- Werkstoff 29(7): 275-278.
- 28 RUSCHE, H. 1973: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 200°C. 2.Mitt.: Reaktionskinetik des Massenverlustes bei Wärmebehandlung von Holz. Holz Roh- Werkstoff 31: 307-312.
- 29 SANDERMANN, W.; AUGUSTIN, H. 1963a, 1963b, 1964: Chemische Untersuchungen über thermische Zersetzung von Holz. Stand der Forschung. Holz Roh- Werkstoff 21: 256-265. Untersuchungen mit Hilfe der Differential-Thermoanalyse. Holz Roh- Werkstoff 21:305-315. Chemische Untersuchung des Zersetzungsablaufes. Holz Roh- Werkstoff 22:377-386.
- 30 SUEMATSU, A.; HIRAI, N.; SAITO, F. 1980: Properties of hot pressed wood. Part 1. Mokuzai Gakkaishi 26: 581-586.
- 31 SCHNEIDER, A. 1971: Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich von 100°C bis 200°C auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefern-Splint- und Buchenholz. Holz Roh- Werkstoff 29(11): 431-440.
- 32 SCHNEIDER, A. 1973: Investigation on the conversion drying of lumber at extremely high temperatures. Part 2. Holz Roh- Werkstoff 31: 198-206.
- 33 STAMM, A.J. 1956: Thermal degradation of wood and cellulose. Ind. Eng. Chem. 38: 630-634.
- 34 STAMM, A.J.; BURR, H.K.; KLINE, A.A. 1946: Staybwood-heatstabilized wood. Ind. Eng. Chem. 38: 630-634.
- 35 SCHWARTZ, E.V. 1964: Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr. Düsseldorf: Schwann.
- 36 STEVENS, W.C. 1960: The thermal expansion of wood. Wood (London) 25(8): 328-329.
- 37 THOMAS, P.H.; BOWES, P.C. 1961: Some aspects of selfheating and ignition of slide cellulosic materials. British Journal of Applied Physics: 222-229.
- 38 TOMEK, A.; LIPTAY, G.; SIMON, J.; ERDEY, L. 1968: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 1 Mitt.: Derivatographische Untersuchung von Zerreiche (*Quercus cerris*). Holz Roh- Werkstoff 26(2): 45-50.
- 39 TOPF, P. 1971a: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 1 Mitt.: Stand der Forschung. Holz Roh- Werkstoff 29(7): 269-275.
- 40 TOPF, P. 1971b: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 2 Mitt.: Versuche zur Frage der

Selbstentzündung, des Gewichtsverlustes, des Brennwertes und der Elementaranalysen. Holz Roh- Werkstoff 29(8): 295-300.

- 41 WEATHERWAX, R.C.; STAMM, A.J. 1946: The coefficients of thermal expansion of wood and wood products. Rep. R 1487 U.S. For. Prod. Lab., Madison.
- 42 WISE, L.E.; JAHN, E.C. 1952: Wood chemistry, New York.
- 43 WÜRGLER, V. 1960: Dokumentation Holz. Bd. IV. Bauphysikalische Grundlagen. Wärme- und Feuchtigkeitsdurchgang. Lignum, Zürich, 73 S.